

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ

О.И. Ильин, А.С. Коломийцев, И.Н. Коц, С.А. Лисицын
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южного Федерального Университета,
ул. Шевченко, 2, Таганрог, Ростовская обл., 347900, Россия,
askolomiytsev@sfsu.ru, lisitsyn.s.a@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей ионно-стимулированного осаждения углерода методом фокусированных ионных пучков. Проведен анализ влияния тока ионного пучка, времени воздействия в точке и ускоряющего напряжения на геометрические параметры формируемых наноразмерных структур. Показано, что для формирования наноструктур с высоким аспектным соотношением минимального размера необходимо использовать минимальные значения тока ионного пучка (1-10 пА) и значения времени воздействия пучка в точке от 800 до 1000 мкс. Показана перспективность метода ФИП при формировании наноразмерных структур для наноэлектроники и нанодиагностики.

Введение

На современном этапе развития электроники одной из основных задач, стоящих перед разработчиками, является микроминиатюризация функциональных элементов ИМС. Решение этой задачи напрямую связано с разработкой и развитием новых методов профилирования поверхности твердых тел, обеспечивающих прецизионное и воспроизводимое формирование наноразмерных структур [1]. Одним из наиболее перспективных методов формирования наноструктур с высокой точностью и разрешающей способностью является метод фокусированных ионных пучков (ФИП) [2,3]. Метод ФИП позволяет в условиях высокого и сверхвысокого вакуума производить технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы без необходимости применения резистов, масок и химических травителей [4]. Принцип метода ФИП заключается в локальной модификации поверхности твердых тел под действием ускоренных до энергии 30 кэВ ионов Ga^+ . При бомбардировке поверхности ионами происходит ее физическое распыление в локализованной области, определяемой диаметром ионного пучка (около 10 нм). При подаче химически активного газа-прекурсора в область воздействия ФИП происходит его диссоциация, в результате которой один из компонентов осаждается на поверхности, а летучие продукты реакции удаляются вакуумной системой [5].

Ионно-стимулированное осаждение материалов методом ФИП активно используется при модификации структур ИМС и микромеханики, создании защитных покрытий при микроскопическом исследовании наноструктур, при подготовке образцов для просвечивающей электронной микроскопии. Несмотря на недостаточно высокую производительность процесса, метод ФИП может также применяться при формировании наноразмерных структур для электроники (квантовых точек, автоэлектронных эмиттеров, точечных контактов) и нанодиагностики (острия зондов, рельефные меры нанометрового диапазона для СЗМ) [6].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований режимов ион-

но-стимулированного осаждения углерода на поверхность кремниевой подложки методом ФИП, определение закономерностей влияния технологических параметров процесса на геометрические параметры формируемых наноразмерных структур.

Экспериментальная часть

В настоящей работе экспериментальные исследования по формированию наноразмерных структур проводились с использованием растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company), оснащенного системой ФИП. Анализ результатов экспериментальных исследований производился методами сканирующей зондовой микроскопии с использованием C3M Solver P-47 PRO (ЗАО «НТ-МДТ»).

На начальном этапе экспериментальных исследований в программе управления Nova NanoLab 600 формировался растровый графический шаблон для проведения ионно-стимулированного осаждения, представляющий собой потоковый файл формата ASCII, содержащий координаты матрицы из 25 точек, в которых ФИП воздействует на подложку, и технологические параметры воздействия ФИП. Формирование наноструктур производилось на кремниевой подложке КЭФ-4.5. В качестве газа-носителя осаждаемого углерода применялся фенантрен ($C_{14}H_{10}$). Фенантрен подавался в зону воздействия ФИП через иглу инжектора, которая подводилась к поверхности подложки на расстояние около 250 мкм. Для точного позиционирования подложки при перемещении между операциями на ней методом ионно-лучевого травления ФИП формировались фигуры совмещения, представляющие собой перекрестия размером 250 мкм на 250 мкм и глубиной около 5 мкм. Параметры ионно-стимулированного осаждения были постоянны для каждого элемента и варьировались от матрицы к матрице. Так параметр времени воздействия ФИП в точке (Dt) варьировался в пределах от 500 мкс до 1200 мкс с шагом в 100 мкс, ток ФИП (I) – от 1 пА до 50 пА, ускоряющее напряжение пучка от 5 кэВ до 30 кэВ. Количество проходов ФИП по шаблону выбиралось фиксированным, равным 500. Осаждение матрицы производилось в области 5 мкм x 5 мкм, таким образом, расстояние между точками соста-

вило около 1 мкм. Время осаждения каждой матрицы структур определялось параметром Dt, временем перемещения пучка от точки к точке (которое составляет около 200 нс или 5 мкс для всей матрицы) и количеством проходов ионного пучка по растровому шаблону. В ходе проведения процесса вакуум в рабочей камере поддерживался на уровне 2×10^{-5} Па. Контроль параметров сформированных структур осуществлялся методом РЭМ в режиме in situ (рис. 1).

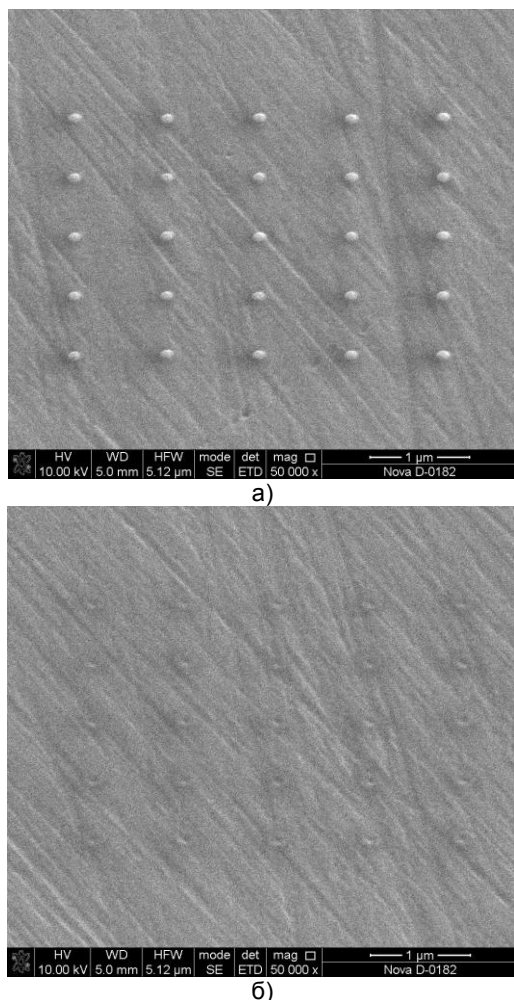


Рис. 1. РЭМ-изображение матрицы 25 структур углерода, сформированных методом ФИП: а) - при $I = 1$ нА, $Dt = 1200$ мкс, б) - при $I = 1$ нА, $Dt = 500$ мкс.

После проведения ионно-стимулированного осаждения образец перемещался в камеру микроскопа Solver P47 PRO. Геометрические параметры сформированных наноразмерных структур исследовались методом полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ). Статистическая обработка экспериментальных результатов производилась при помощи программного пакета Image Analysis 2.0 (ЗАО «НТ-МДТ»).

Результаты и их обсуждение

На основании результатов, полученных в ходе АСМ-исследований и их статистической обработки, были построены графики экспериментальных зависимостей диаметра и высоты наноразмерных

структур от тока ФИП, времени воздействия в точке и ускоряющего напряжения, как показано на рис. 2.

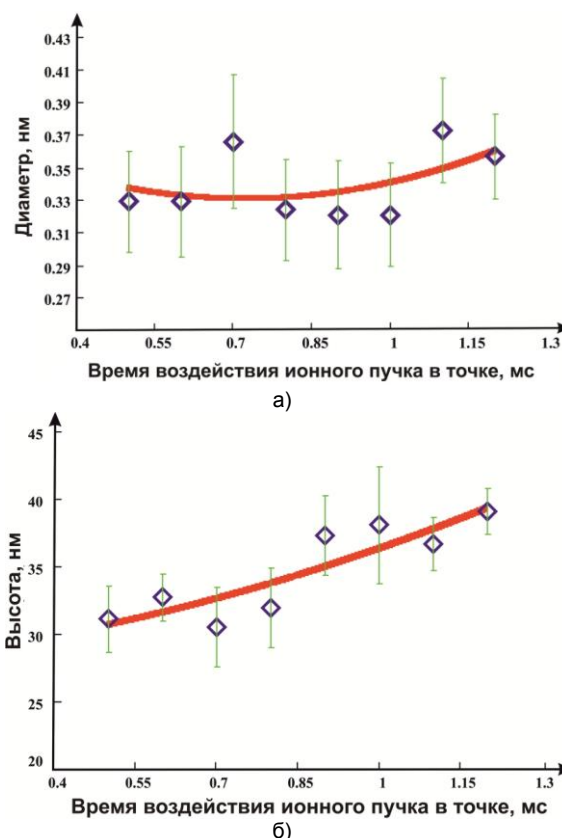


Рис. 2. Зависимости диаметра (а) и высоты (б) наноразмерных структур углерода от времени воздействия ионного пучка в точке при $I = 1$ нА.

Зависимости высоты и диаметра от тока показывают, что с увеличением тока ФИП возрастают диаметр и глубина. Это объясняется увеличением диаметра ионного пучка и, соответственно, площади его взаимодействия с газом-носителем углерода. Анализ результатов исследования матриц показал, что при больших значениях тока ФИП (50 нА) осаждение структур углерода не происходило при всех значениях времени воздействия в точке из выбранного диапазона (рис. 1б). Наблюдаемый факт является следствием увеличения интенсивности потока ионов, при котором возникают условия, препятствующие дальнейшему доступу молекул газа в область бомбардировки. Таким образом, при средних и больших значениях тока ФИП имеют место конкурирующие процессы осаждения и травления, смещение баланса в одну из сторон зависит от сочетания остальных параметров процесса. Анализ влияния ускоряющего напряжения на диаметр и высоту структур показал, что при ускоряющем напряжении от 10 до 30 кэВ процесс осаждения происходит, тогда как при 5 кэВ травление преобладает над осаждением. Диаметр наноструктур с увеличением ускоряющего напряжения убывает, что объясняется лучшей фокусировкой ионного пучка при высоких энергиях ионов. При малых энергиях ФИП интенсивность разложения газа

ниже, соответственно выше вероятность перехода осаждения в травление. Зависимости диаметра и высоты сформированных наноразмерных структур от времени воздействия ФИП в точке представлены на рис. 2. Анализ зависимостей показывает, что с увеличением времени воздействия в точке высота наноразмерных структур возрастает, а диаметр при этом остается практически неизменным. Таким образом, целесообразно увеличивать время для получения структур малого диаметра с высоким аспектным соотношением. Так как распределение интенсивности ионов в пучке описывается распределением Гаусса, слабое увеличение значения диаметра с увеличением времени объясняется более длительным взаимодействием периферийных областей пучка с газом-носителем, вызывающим незначительное разрастание структур. Уменьшение скорости возрастания высоты наноструктур при больших временах воздействия в точке объясняется недостаточным обновлением газа в области воздействия, что снижает общую скорость осаждения.

Полученные результаты были использованы при формировании острия в ходе модификации зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силового микроскопа (рис. 3).

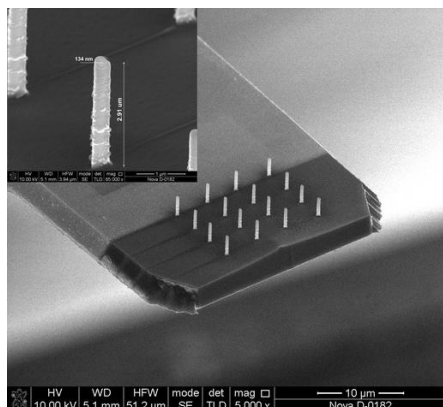


Рис. 3. РЭМ-изображение модифицированного методом ФИП кантилевера атомно-силового микроскопа.

Заключение

Таким образом, в работе проведены исследования режимов ионно-стимулированного осаждения

наноразмерных структур углерода на подложку кремния методом ФИП. Установлено определяющее влияние тока ФИП на скорость ионно-стимулированного осаждения. Показано, что для формирования наноструктур с высоким аспектным соотношением минимального размера необходимо использовать значения тока ионного пучка в диапазоне 1-10 пА и значения времени воздействия пучка в точке от 800 до 1000 мкс. Выявлено, что увеличение времени воздействия ионного пучка в точке существенно влияет на высоту формируемых наноструктур и незначительно на увеличение их диаметра. Полученные закономерности позволяют прогнозировать геометрические параметры наноразмерных структур углерода при различных значениях технологических параметров ФИП. Результаты работы могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования перспективных элементов наноэлектроники и структур нанодиагностики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31162 мол_а, а также Министерства образования и науки в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание №16.1154.2014/К).

Список литературы

1. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. // Semiconductors. 2011. V. 45. №13. P. 89-92
2. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2011. №3 (89). С. 20-25.
3. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. Москва: Физматлит. 2006. 522 с.
4. Giannuzzi L.A., Stevie F.A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. New York: Springer. 2004. P. 357.
5. Ageev O.A., Громов А.Л., Ильин О.И., Коломийцев А.С. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 117. №4. С. 171-180.
6. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Serbu N.I., Smirnov V.A. // Russian Microelectronics. 2012. V. 41. № 1. P. 41-50.

FORMATION OF NANOSTRUCTURES USING LOCAL ION-ASSISTED DEPOSITION

Oleg Ilin, Alexey Kolomiitsev, Ivan Kots & Sergey Lisitsyn

Institute of Nanotechnologies and Electronic Equipment Engineering,

2 Shevchenko st., Taganrog, Rostov region, 347900, Russia, askolomiitsev@sfedu.ru, lisitsyn.s.a@gmail.com

The results of experimental studies of modes in which nanosize structures are formed on a silicon substrate by method of local ion-assisted deposition using focused ion beam are presented. Dependences of the diameter and height of the nanosize structures on the ion beam current, accelerating voltage and time of exposure to the ion beam at a point are obtained. It is demonstrated that the main factor determining the rate of ion-assisted deposition is the ion beam current. It is shown that for production of high aspect ratio nanostructures it is necessary to use the minimum value of the ion beam current (1-10 pA) and the values of the exposure time at 800 to 1000 microseconds. The results of the study can be used in the development of technological processes for the fabrication of components for nanoelectronics and nanodiagnostics.